

بررسی تاثیر نرخ بارگذاری آزمایش خمش نیم دایره‌ای بر پارامترهای مختلف مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط

مقاله علمی - پژوهشی

افشار یوسفی عباسعلیلو*، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
عطا نوروزی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
یاشار یوسفی عباسعلیلو، دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، اردبیل، ایران
سعید صبحی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: afshar_yusefi@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۱۷۶-۱۶۳

چکیده

ترک خوردگی روسازی آسفالتی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های روسازی است که می‌تواند ناشی از خستگی و پیر شدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط محیطی و بار ترافیکی بوده و باعث ایجاد خرابی‌های دیگر در روسازی‌های آسفالتی گردد. به همین علت بررسی رفتار شکست و ارزیابی دقیق پارامترهای مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی و پارامترهای موثر بر آن، می‌تواند مهندسان روسازی را در امر طراحی و احداث روسازی با کیفیت کمک نماید. در این تحقیق از نمونه‌های خمش نیم دایره‌ای^۱ (SCB) به منظور ارزیابی تاثیر نرخ بارگذاری آزمایش بر پارامترهای مختلف مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط ۲۵ سانتی‌گراد استفاده شده است. هدف اصلی از این تحقیق، تعیین مناسب‌ترین نرخ بارگذاری برای آزمایش SCB در دمای متوسط، با در نظر گرفتن ضریب تغییرات آزمایش و با نمونه‌هایی به مشخصات هندسی قطر و ضخامت، ۱۵ و ۳ سانتی متر و طول ترک برابر با ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. بدین منظور نمونه‌های SCB تحت نرخ‌های بارگذاری ۰/۵، ۱، ۵، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته و پارامترهای حداکثر بار^۲ برای ترک خوردگی نمونه‌های آسفالتی (PL)، انرژی شکست^۳ نمونه‌های آسفالتی (FE)، شاخص انعطاف‌پذیری^۴ (FI) و نشانه‌ی مقاومت در برابر ترک خوردگی (CRI) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ بارگذاری همواره مقدار PL و FE برای گسیختگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد، ولی FI و CRI با افزایش نرخ بارگذاری روال مشخصی ندارند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها و ارزیابی ضریب تغییرات^۶ (COV) پارامترهای ذکر شده، نرخ بارگذاری ۳ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه برای استفاده در آزمایش SCB توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)، دمای متوسط، شاخص انعطاف‌پذیری، ضریب تغییرات، نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی، نرخ بارگذاری

۱- مقدمه

لایه ی آسفالتی ایجاد می‌گردد و با گذر زمان به سطح روسازی گسترش می‌یابند. این ترک‌ها با ایجاد راهی برای نفوذ رطوبت به

ترک‌های خستگی یکی از خرابی مهم در روسازی است که به دلیل تکرار بارگذاری ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه در زیر

پایین (Pirmohammad & Kiani, 2016; Pirmohammad, Majd-Shokorlou, & Amani, 2019; A. Yousefi, Pirmohammad, & Sobhi, 2020; Zofka & Braham, 2009) و ترک های ناشی از خستگی در دمای متوسط استفاده می شود که امروزه استفاده از این تست در دماهای متوسط جهت ارزیابی خستگی مخلوط های آسفالتی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (Al-Qadi et al., 2015; Im, Ban, & Kim, 2014; Wu, Mohammad, Wang, & Mull, 2005; Afshar Yousefi, Behnood, Nowruzi, & Haghshenas, 2021). اخیراً مرکز حمل و نقل ایلینویز به منظور بررسی مقاومت مخلوط های آسفالتی در دمای متوسط از شاخصی تحت عنوان شاخص انعطاف پذیری ایلینویز⁹ (I-FIT) استفاده کرده اند (Al-Qadi et al., 2015). شاخص انعطاف پذیر در واقع برگرفته از تلفیق تاثیر انرژی شکست و شیب نقطه عطف نمودار بار جابه جایی می باشد. مطالعات امروزی نشان می دهد که شاخص انرژی شکست به تنهایی شاخص مناسبی برای تشخیص خواص شکست دمای متوسط بین مخلوط های آسفالتی نبوده و شاخص FI عملکرد بهتری نسبت به شاخص انرژی شکست داشته و بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد (Al-Qadi et al., 2015; Kaseer et al., 2018; Ozer et al., 2016) و علاوه بر این، شاخص FI در مقایسه با انرژی شکست نسبت به تغییرات طرح اختلاط مخلوط آسفالتی حساس تر می باشد (Ling, Swiertz, Mandal, & Teymourpour, & Bahia, 2017). نسنگیوم و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش تجربی-آماری حداقل تعداد نمونه های لازم برای ارزیابی پارامترهای مکانیک شکست مخلوط های آسفالتی را تعیین کرده و سپس تاثیر هریک از پارامترهای ضخامت نمونه، طول ترک در نمونه، نرخ بارگذاری و دمای آزمایش بر مکانیک شکست مخلوط های آسفالتی را ارزیابی کردند و با توجه به ضریب تغییرات حاصل از داده های پارامترهای مورد بررسی، موثرترین محدوده ی مقادیر هریک از پارامترهای مورد بررسی را پیشنهاد دادند (Nsengiyumva, 2015). سلیمانیان و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با بررسی تاثیر دما و نرخ بارگذاری بر پارامترهای مکانیک شکست مخلوط های آسفالتی، نظیر مقدار نیرو و انرژی لازم برای شکست و شاخص انعطاف پذیری نمونه های مخلوط آسفالتی، دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و نرخ بارگذاری ۵ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه را مناسب ترین ترکیب برای ارزیابی خستگی مخلوط های آسفالتی

داخل روسازی، به طور قابل توجهی دوام و مقاومت روسازی آسفالتی را کاهش داده و باعث ایجاد خرابی های دیگر در روسازی می گردند. بدین منظور ارزیابی دقیق خواص مکانیک شکست مخلوط آسفالتی و عوامل موثر بر آن برای نزدیک کردن شرایط آزمایشگاهی به شرایط واقعی و محلی از اقدامات موثر در شناخت و بهبود روسازی خواهد بود (Nsengiyumva, You, & Kim, & Beran, 2016). برای ارزیابی مکانیک شکست و ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی از آزمایش مختلفی نظیر آزمایش کشش غیر مستقیم⁷ (IDT) مطابق آیین نامه AASHTO T322، آزمایش تیر خمشی مطابق آیین نامه AASHTO T321، آزمایش خمش نیم دایره ای (SCB) طبق آیین نامه AASHTO TP105 و آزمایش کشش تمام دیسکی⁸ (DCT) نیز مطابق شماره آیین نامه ASTM D7313 استفاده می گردد (Aliha, Bahmani, & Akhondi, 2016; L. Chen, Qian, & Wang, 2015; Molenaar, Scarpas, Liu, & Erkens, 2002; Wagnoner, Buttlar, & Paulino, 2005; A. A. Yousefi, Sobhi, Aliha, Pirmohammad, & Haghshenas, 2021). از میان آزمایش های یاد شده، آزمایش SCB تمام ویژگی های بیان شده را دارا بوده و یکی از آزمایش های رایج در بحث مقاومت شکست مخلوط آسفالتی می باشد. برخی از مزایای این آزمایش نسبت به سایر آزمایش ها: (۱) آماده سازی آسان نمونه جهت انجام آزمایش (۲) تهیه چهار نمونه از یک نمونه متراکم شده می باشد (X. Chen & Solaimanian, 2019). در سال ۲۰۱۲ لیو و همکارانش گزارش کردند که آزمایش کشش غیرمستقیم (IDT) و آزمایش تیر خمشی نمی توانند به طور کامل مقاومت ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی را ارزیابی کنند (Liu & Li, 2012). در سال ۲۰۱۷ ژوو و همکاران در بین آزمایش های مختلف جهت بررسی مکانیک شکست و خستگی، چند عامل را به عنوان مهمترین پارامترها در انتخاب نوع آزمایش در نظر گرفتند که عبارت اند از: الف) دسترسی آسان تجهیزات آزمایش، ب) کمترین ضرایب پخش و ضریب تغییرات نتایج آزمایش، ج) همبستگی نتایج آزمایشگاهی با نتایج محلی و د) تفسیر آسان نتایج آزمایش. آزمایش SCB به دلیل سادگی و انجام سریع این تست و نزدیک بودن به شرایط میدانی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. این آزمایش اولین بار به منظور مطالعه مقاومت شکست نمونه های سنگی مورد استفاده قرار گرفت (Chong & Kuruppu, 1984). از نمونه های SCB به منظور ارزیابی مقاومت در برابر ترک خوردگی های حرارتی در دماهای

ناحیه‌ی شمالی آمریکا پیشنهاد دادند (X. Chen & Solaimanian, 2019). علی رغم تحولات اخیر در زمینه ارزیابی خواص مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمون SCB و تایید محققان مختلف بر تاثیر شرایط محیطی و ترافیکی، شکل هندسی و پارامترهای دیگر بر مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی، بیشتر محققان نرخ بارگذاری و دمای انجام آزمایش را براساس تجربه و سهولت انجام کار انتخاب می نمایند. بنابراین لازم است به ازای هر تغییر در نمونه‌های مورد نظر و شرایط محیطی، شرایط انجام آزمایش ارزیابی و اصلاح گردد. در این تحقیق با در نظر گرفتن مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش SCB تاثیر تغییرات نرخ بارگذاری بر روی پارامترهای مکانیک شکست مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. رفتار مخلوط آسفالتی تحت بار به شدت تحت تاثیر میزان نرخ بارگذاری و دما می‌باشد. هدف اولیه این مطالعه بررسی تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر روی پارامترهای متفاوت مکانیک شکست مخلوط آسفالتی در دمای متوسط است. دو هدف دیگر این تحقیق به شرح زیر بیان می‌شوند.

-مقایسه پارامترهای مختلف معرفی شده محققان جهت ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای ۲۵ سانتی‌گراد.
-تعیین نرخ بارگذاری مناسب در دمای متوسط با در نظر گرفتن ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌های پارامترهای مورد بررسی بر روی نمونه‌های SCB مورد مطالعه در این پژوهش است.

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی ۶۰/۷۰

نوع آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ در دمای ۲۵ سانتیگراد	ASTM D5	۶۲
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۸/۵
شکل پذیری در دمای ۲۵ سانتیگراد	ASTM D113	۱۳۰
درجه اشتعال	ASTM D92	۲۹۰
چگالی	ASTM D70	۱/۰۱۸

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

نوع آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش
سایش لس آنجلس (درصد)	ASTM C535	۱۴
وزن مخصوص درشت دانه (gr/cm^3)	ASTM D127	۲/۵۱
وزن مخصوص ریز دانه (gr/cm^3)	ASTM D128	۲/۶۷
درصد شکستگی (در دو جبهه)	ASTM D5821	۹۳
ارزش ماسه ای (درصد)	ASTM C88	۶۷

۲- مصالح

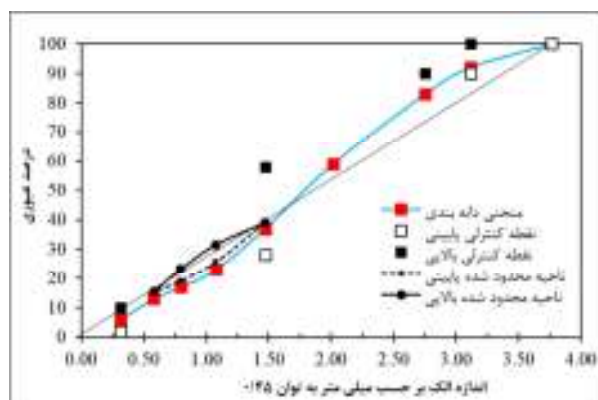
۲-۱- قیر ۶۰/۷۰

قیر در مخلوط بتن آسفالتی به‌عنوان یک عامل چسباننده عمل می‌کند که مصالح سنگی را به‌صورت یک حجم پیوسته پیوند می‌دهد. قیر یک ماده با رفتار ویسکوالاستوپلاستیک است که مقاومت و خصوصیات رفتاری فیزیکی آن وابسته به دما است. قیر مصرفی مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص با درجه‌ی نفوذ ۶۰/۷۰ است که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه‌شده است. نوع قیر و خصوصیات آن در جدول ۱ نشان داده‌شده است.

۲-۲- مصالح سنگی

در این پژوهش، از مصالح سنگی رودخانه ای تهیه شده از کارخانه‌ی آسفالت شرکت آسفالت هادپی واقع در شرق تهران با درصد بالای سلیس و حداکثر اندازه‌ی اسمی ۱۲٫۵ میلی‌متر استفاده شده است. خصوصیات سنگدانه‌ها در جدول ۲ آمده است.

دانه‌بندی مصالح سنگی با توجه به استاندارد و محدودیت‌های طرح اختلاط حجمی سوپر پیو در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی برای ساخت مخلوط آسفالتی

۳- ساخت نمونه‌های آسفالتی و نیم دایره‌ای

نظر به مدت ۲ ساعت در دمای اختلاط (145°C) قرار گرفت. در این تحقیق به منظور ساخت نمونه‌های SCB ابتدا نمونه‌های به ارتفاع ۱۵ سانتی متر با دستگاه متراکم کننده ژیراتوری سوپرپیو ساخته شد. سپس نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده مطابق شکل ۲ به نمونه‌های دیسکی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر برش داده و هر نمونه دیسکی به دو قسمت نیم دایره نصف می‌شوند که اصطلاحاً به نمونه‌های SCB شناخته می‌شوند. سپس در وسط نمونه‌های SCB به وسیله یک تیغه با ضخامت حدود ۰/۳ میلی‌متر، برشی به طول ۱۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر ایجاد شد.

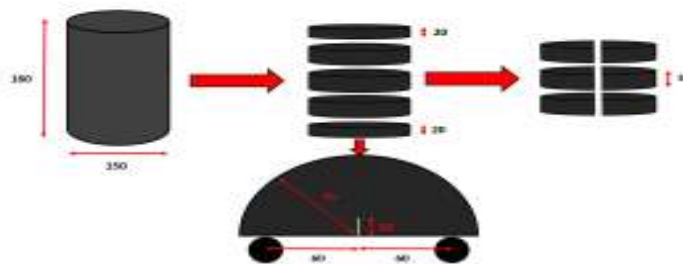
در این پژوهش برای تعیین درصد بهینه‌ی مخلوط‌های آسفالتی از روش طرح اختلاط سوپر پیو با سطح ۱ و برای ترافیک سنگین (با تعداد ژیراسیون ۱۲۱ و درصد فضای خالی برابر ۴ درصد مخلوط آسفالتی) استفاده شده است که پارامترهای حجمی برای مخلوط‌های مورد نظر در جدول ۳ آمده است. در این تحقیق برای خشک کردن مصالح، قبل از عمل اختلاط مصالح سنگی به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۶۰ سانتی‌گراد قرار گرفته و با توجه به ویسکوزیته ی قیر مورد نظر، قیر به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۵۰ سانتی‌گراد نگه داده شد. سپس بعد اختلاط، مخلوط مورد

جدول ۳. پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی

Mixture description	Va (%)	Pb (%)	VMA (%)	VFB (%)	Gmm (g/cm^3)	Dust/binder (%)
Virgin aggregates(94.7%) + Bitumen 60/70 (5.3%)	4	5.3	16.33	69.2	2.316	0.88

Va = درصد هوای خالی در مخلوط آسفالتی، Pb = درصد قیر بهینه، VMA = فضای خالی در سنگدانه معدنی،

VFB = فضای پر شده با قیر، Gmm = فضای پر شده با قیر

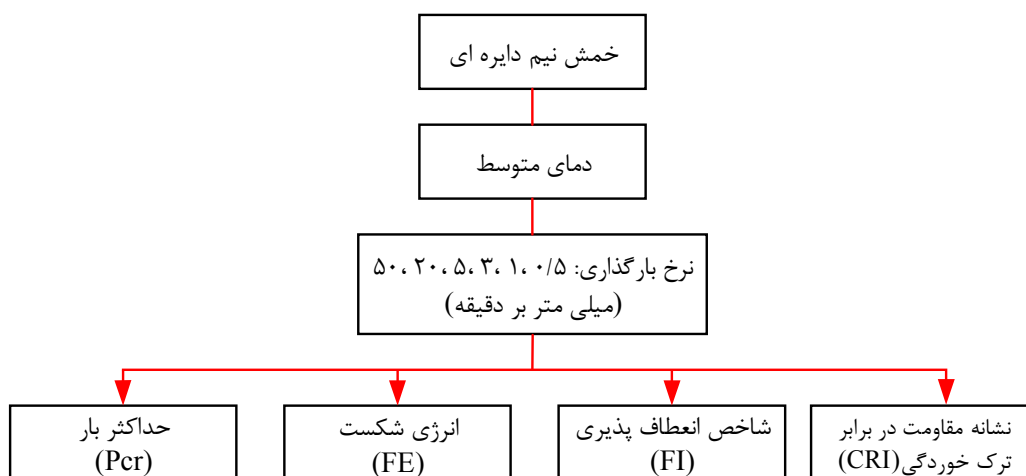


شکل ۲. مراحل آماده سازی نمونه‌های SCB

۴- برنامه‌ی آزمایشگاهی

مدت ۶ ساعت در دمای ۲۵ درجه ی سانتی‌گراد قرار داده شده تا تمام جسم نمونه‌ها از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشند. مطابق فلوجارت آزمایشگاهی شکل ۳ در نرخ‌های متفاوت پارامترهای مختلف مکانیک شکست عبارت‌اند از پارامترهای حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها (Pcr)، مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها (FE)، نشانه انعطاف پذیری (FI) و نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی (CRI) با استفاده منحنی نیرو و جابه‌جایی (شکل ۵) و با استفاده از نرم‌افزار I-FIT طراحی شده توسط دانشگاه ایلینویز محاسبه گردید.

در این تحقیق تاثیر نرخ بارگذاری بر پارامترهای مکانیک شکست مخلوط های آسفالتی در دمای متوسط با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتون، بر اساس بارگذاری یکنواخت مود I تحت بارگذارهای استاتیکی با نرخ‌های متغیر ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۲۰ و ۵۰ میلی متر بر دقیقه با در نظر گرفتن ضریب تغییرات مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور کاهش میزان خطای آزمایش تحت آزمایش شکست برای هر نرخ بارگذاری هشت نمونه یکسان (با ۸ تکرار) انتخاب گردید که در شکل ۴ نحوه قرارگیری نمونه در زیر دستگاه یونیورسال نشان داده شده است. به منظور مهیا ساختن نمونه‌ها جهت انجام تست، نمونه‌ها را به



شکل ۳. فلوجارت آزمایشگاهی



شکل ۴. نحوه قرارگیری نمونه در زیر دستگاه یونیورسال

۴-۱- بار بحرانی (PL)

کیلو نیوتن بر میلی متر و A ضریب تبدیل واحد و ضریب مقیاس گذاری تعریف شده است و در این مطالعه برابر ۰/۰۱ می باشد.

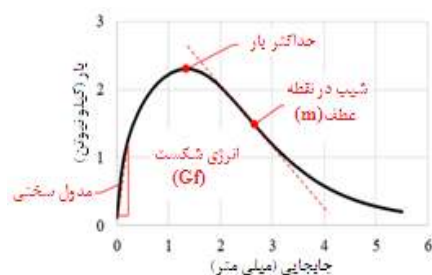
حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه های مخلوط آسفالتی قبل از ترک خوردگی، بار بحرانی آن نمونه تعریف می شود که با رسیدن بار به این مقدار نمونه شروع به ترک از محل برش می گردد.

۴-۲- نشانه ی مقاومت در برابر ترک خوردگی (CRI)

در سال ۲۰۱۸، کاسر و همکارانش به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط شاخص FI را توسعه داده و از یک شاخص جدیدی با عنوان نشانه ی مقاومت در برابر ترک خوردگی (CRI) استفاده کردند (Kaseer et al., 2018) که در این رابطه بجای شیب در نقطه عطف مقدار P_{max} جایگذاری شده و طبق رابطه ی (۳) محاسبه می گردد.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (3)$$

که در این رابطه G_f برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع و P_{max} حداکثر نیروی وارده بر نمونه بر حسب کیلو نیوتن است.



شکل ۵. نتیجه ی حاصل از منحنی بار جابجایی آزمایش SCB (شامل پارامترهای حداکثر بار، شیب در نقطه عطف و انرژی شکستگی)

۴-۲- انرژی لازم برای شکست نمونه ها (FE)

مقدار انرژی لازم برای ترک خوردگی (شکست) نمونه های مخلوط آسفالتی می باشد که در آزمایش SCB به عنوان مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی تعریف می شود. در واقع این شاخص نشان دهنده ظرفیت کلی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شکست ناشی از خرابی در دمای پایین (ترک خوردگی حرارتی) و دمای متوسط (ترک خوردگی ناشی از خستگی) می باشد. این شاخص مطابق رابطه (۱) از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجه جایی به سطح مقطع ترک خورده بدست می آید.

$$G_f = \frac{W_f}{A} = \int (P) du / A \quad (1)$$

که در این رابطه G_f مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع و W_f مقدار کار لازم برای شکست مخلوط آسفالتی بر حسب ژول و A سطح مقطع ترک خورده بر حسب مترمربع نمونه ی آسفالتی است.

۴-۳- نشانه ی انعطاف پذیری (FI)

نشانه انعطاف پذیری پارامتری برای تشخیص مخلوط های شکننده است که به ترک های زودرس حساس می باشند. مطالعات القادی و همکاران نشان داد که انرژی لازم برای شکست نمونه در دمای متوسط به تنهایی شاخص مناسبی برای اندازه گیری مقاومت ترک خوردگی نمی باشد. بنابراین، این شاخص به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط برای اولین بار در سال ۲۰۱۶ در دانشگاه ایلینویز آمریکا معرفی و مورد استفاده قرار گرفت (Ozer et al., 2016) که از رابطه ی (۲) به دست می آید.

$$FI = A * \frac{G_f}{|m|} \quad (2)$$

که در این رابطه G_f برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع، $|m|$ برابر شیب در نقطه ی عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجه جایی بر حسب

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تأثیر نرخ های مختلف بارگذاری بر حداکثر نیروی لازم برای شکستگی مخلوط های آسفالتی

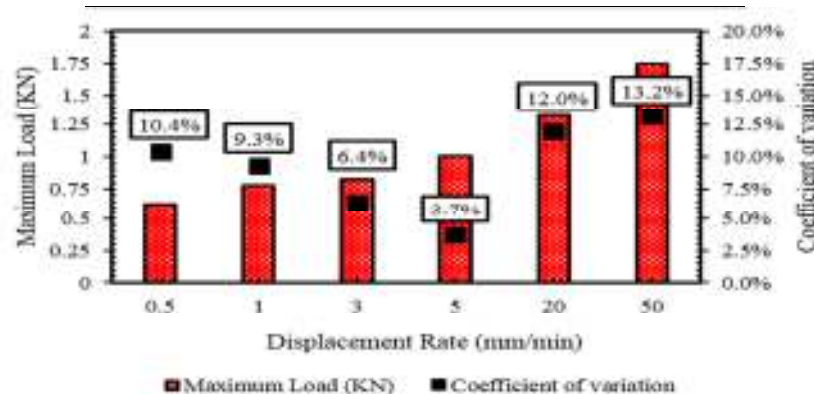
تأثیر نرخ بارگذاری های مختلف بر حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی در شکل ۶ و جدول ۴ نمایش داده شده است. همان طور، که در شکل دیده می شود همواره با افزایش میزان نرخ بارگذاری مقدار نیروی لازم برای ترک خوردگی در مخلوط آسفالتی افزایش می یابد. به طوری که این افزایش برای نرخ ۵۰ میلی متر بر دقیقه بیش از ۵۰ درصد نسبت به نرخ ۵ میلی متر بر دقیقه است. طبق شکل ۶ و جدول ۴ می توان

مقدار را دارد و بیشترین ضریب تغییرات نمونه‌های مورد بررسی مربوط به نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه است.

مشاهده کرد که میزان پراکندگی حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌های SCB در نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه برابر ۳/۷ درصد بوده و نسبت به بقیه‌ی نرخ‌های بارگذاری انتخابی کمترین

جدول ۴. مقادیر بار بحرانی به دست آمده در نرخ‌های مختلف بارگذاری

نرخ بارگذاری (میلی متر / دقیقه)	میانگین حداکثر بار (کیلو نیوتن)	ضریب تغییرات (درصد)
۰/۵	۰/۶۲۵۴	۱۰/۴
۱	۰/۷۷۶۲	۹/۳
۳	۰/۸۲۸۴۵	۶/۴
۵	۱/۰۰۴۳	۳/۷
۲۰	۱/۳۲۸	۱۲
۵۰	۱/۷۴۳۷	۱۳/۲



شکل ۶. تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر میزان حداکثر نیروی لازم برای شکستگی مخلوط‌ها آسفالتی

در دمای ۲۵ سانتی‌گراد

کاهش جابه‌جایی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب مقدار انرژی لازم برای شکستن نمونه‌ها با افزایش نرخ بارگذاری همواره افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۷ و جدول ۵ می‌توان گفت که با افزایش نرخ بارگذاری همواره انرژی لازم برای شکست نمونه‌های SCB در دمای متوسط افزایش یافته است و به ترتیب در نرخ‌های ۰/۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه حداقل و حداکثر انرژی لازم برای شکست نمونه‌های SCB به دست آمده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ بارگذاری میزان ضریب تغییرات و پراکندگی نتایج حاصل از انرژی لازم برای شکستن نمونه‌های SCB افزایش یافته است و تنها در نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه این روال رعایت نشده است.

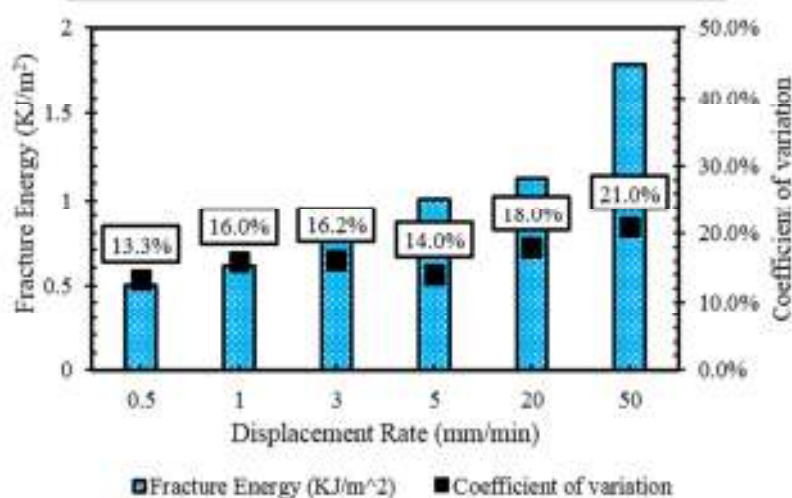
۲-۵- تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر انرژی لازم

برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی

تاثیر نرخ بارگذاری‌های مختلف بر انرژی لازم برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۷ و جدول ۵ آورده شده است. نتایج انرژی لازم برای شکستگی مخلوط آسفالتی روند مشابهی با نتایج حداکثر نیروی لازم برای شکستگی دارد به طوری که با توجه به نمودار مشاهده می‌گردد. با افزایش نرخ بارگذاری حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته و از طرفی مقدار جابه‌جایی نمونه‌های آسفالتی با افزایش نرخ بارگذاری کاهش می‌یابد ولی این افزایش بار حداکثر نسبت به کاهش جابه‌جایی خیلی بیشتر بوده و تاثیر

جدول ۵. مقادیر انرژی لازم برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی به دست آمده در نرخ‌های مختلف بارگذاری

نرخ بارگذاری (میلی متر/ دقیقه)	میانگین انرژی شکست (کیلو نیوتن)	ضریب تغییرات (درصد)
۰/۵	۰/۵۰۲	۱۳/۳
۱	۰/۶۱۲	۱۶
۳	۰/۹۰۶	۱۶/۲
۵	۱/۰۱۰	۱۴
۲۰	۱/۱۲۷	۱۸
۵۰	۱/۷۹۴	۲۱



شکل ۷. تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر میزان انرژی لازم برای شکستگی مخلوط‌ها آسفالتی در دمای ۲۵ سانتی‌گراد

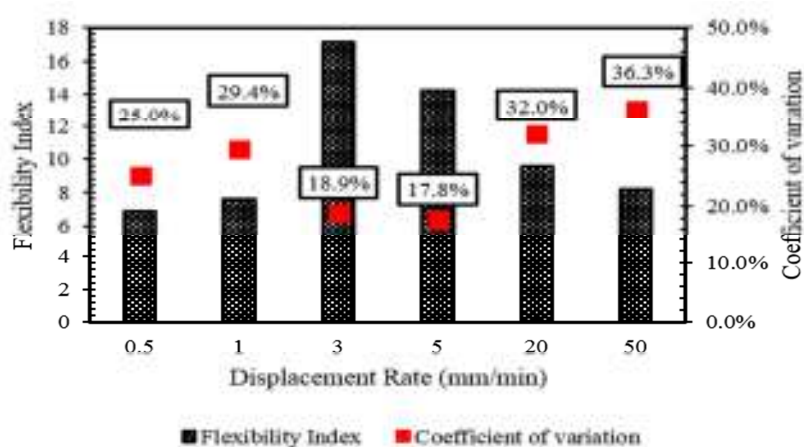
شاهده روند ثابتی در افزایش یا کاهش این شاخص نیستیم. طبق شکل ۸ و جدول ۶ مشاهده می‌شود که بیشترین شاخص انعطاف پذیری در دمای متوسط در نرخ‌های ۳ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمده است. در این ارزیابی نیز کمترین شاخص پراکندگی و ضریب تغییرات داده‌های مربوط به شاخص انعطاف‌پذیری مربوط به نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه است.

۵-۳- تأثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر شاخص انعطاف پذیری مخلوط‌های آسفالتی

تأثیر نرخ بارگذاری‌های مختلف بر شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۸ و جدول ۶ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه شاخص انعطاف‌پذیری متأثر از دو پارامتر دیگر (m و Gf) می‌باشد. بنابراین، با افزایش نرخ بارگذاری

جدول ۶. مقادیر شاخص انعطاف پذیری مخلوط‌های آسفالتی به دست آمده در نرخ‌های مختلف بارگذاری

نرخ بارگذاری (میلی متر/ دقیقه)	میانگین شاخص انعطاف پذیری	ضریب تغییرات (درصد)
۰/۵	۶/۸۸	۲۵
۱	۷/۵۷	۲۹/۴
۳	۱۷/۱	۱۸/۹
۵	۱۴/۲۳	۱۷/۸
۲۰	۹/۵۵	۳۲
۵۰	۸/۱۹	۳۶/۳



شکل ۸. تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌ها آسفالتی در دمای ۲۵ سانتی‌گراد

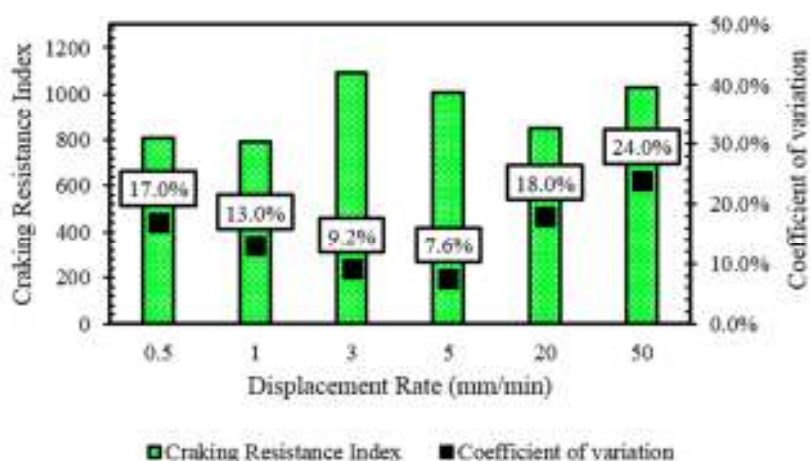
هر نرخ بارگذاری می‌توان گفت که نرخ بارگذاری ۵ و ۵۰ به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند. با مقایسه شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی مشاهده می‌شود که مقدار CRI نسبت FI ضریب تغییرات کمتری دارد که علت آن شاخص پراکندگی کمتر مقدار P_{max} نسبت به شیب نقطه عطف منحنی باشد. بنابراین، می‌توان گفت که شاخص CRI نسبت FI به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد و می‌تواند فرق بین مخلوط‌های آسفالتی با خصوصیات متمایز را بیشتر نشان دهد.

۵-۴- تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی

تاثیر نرخ بارگذاری‌های مختلف بر نشانه‌ی مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۹ و جدول ۷ نمایش داده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که نرخ بارگذاری بر شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی نمونه‌های SCB مخلوط آسفالتی تاثیر داشته است و بیشترین مقدار این پارامتر برای نرخ‌های ۳ و ۵ میلی متر بر دقیقه به دست آمده است و با مقایسه‌ی ضریب تغییرات (COV) نتایج به دست آمده برای

جدول ۷. مقادیر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطهای آسفالتی به دست آمده در نرخهای مختلف بارگذاری

نرخ بارگذاری (میلی متر / دقیقه)	میانگین نشانه در برابر ترک خوردگی	ضریب تغییرات (درصد)
۰/۵	۸۰۲/۸۱	۱۷
۱	۷۸۹/۷۳	۱۳
۳	۱۰۹۴/۰۳	۹/۲
۵	۱۰۰۵/۹۲	۷/۶
۲۰	۸۴۸/۹۶	۱۸
۵۰	۱۰۲۹/۰۷	۲۴



شکل ۹. تاثیر نرخهای مختلف بارگذاری بر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطها آسفالتی در دمای در دمای ۲۵ سانتی گراد

۵-۵- ضریب تغییرات مربوط به پارامترهای شکست نمونههای SCB (Pcr، FE، FI و CRI)

گرفتن میانگین ضریب تغییرات تمامی پارامترهای مورد بحث، مشاهده می شود که نرخ بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه و ۵۰ میلی متر بر دقیقه به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب تغییرات را دارند. بنابراین، توصیه می شود. در شرایط مشابه هندسی نمونههای SCB ساخته شده در این مطالعه، نرخ ۵ میلی متر بر در دقیقه در این آزمایش مورد استفاده قرار گیرد.

ضریب تغییرات مربوط به پارامترهای شکست نمونههای SCB به طور در جدول ۸ نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۸ می توان گفت که میزان ضریب تغییرات برای Pcr و FE و FI و CRI به ترتیب در محدوده های ۱۳/۲-۳/۷ درصد و ۲۱-۱۳/۳ درصد و ۱۷/۸-۳۶/۳ درصد و ۷/۶-۲۴ درصد است. Pcr کمترین ضریب تغییرات را بین پارامترهای دیگر دارا می باشد و پارامترهای FI و CRI طبق رابطه شان وابسته به دو پارامتر مستقل دیگر بوده و بیشترین ضریب تغییرات را دارند. با در نظر

جدول ۸ مقدار ضریب تغییرات مربوط به پارامترهای مکانیک شکست (CRI و FI، FE، Pcr)

پارامترها	ضریب تغییرات					
	۰/۵ میلی متر بر دقیقه	۱ میلی متر بر دقیقه	۳ میلی متر بر دقیقه	۵ میلی متر بر دقیقه	۲۰ میلی متر بر دقیقه	۵۰ میلی متر بر دقیقه
Pcr	۱۰/۴	۹/۳	۶/۴	۳/۷	۱۲	۱۳/۲
FE	۱۳/۳	۱۶	۱۶/۲	۱۴	۱۸	۲۱
FI	۲۵	۲۹/۴	۱۸/۹	۱۷/۸	۳۲	۳۶/۳
CRI	۱۷	۱۳	۹/۲	۷/۶	۱۸	۲۴
Average	۱۶/۴	۱۶/۹	۱۲/۷	۱۰/۸	۲۰	۲۳/۶

۶- نتیجه گیری

نسبت FI به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد و می‌تواند فرق بین مخلوط‌های آسفالتی با خصوصیات متمایز را بیشتر نشان دهد. -با میانگین‌گیری از ضریب تغییرات مربوط هر یک از پارامترهای مربوط به مکانیک شکست می‌توان گفت برای نمونه‌های با قطر ۱۵ و ضخامت ۳ سانتی‌متر و طول برش حدود ۱۸ میلی‌متر، نرخ بارگذاری ۳ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به سایر نرخ‌های بارگذاری کمترین پراکندگی داده‌ها را داشته است و نتایج نسبتاً دقیق‌تری دارند.

-با توجه به این که شرایط محیطی (دمای انجام آزمایش) و ضخامت و مشخصات فیزیکی علاوه بر نرخ بارگذاری می‌تواند بر هر یک از پارامترهای مکانیک شکست تاثیرگذار باشد، پیشنهاد می‌گردد که تحقیق مورد نظر در شرایط دمایی مختلف و گونه‌های با شکل هندسی مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Semi-Circular Bending
2. Peak Load
3. Fracture Energy
4. Flexibility Index
5. Cracking Resistance Index
6. Coefficient of Variation
7. Indirect Tensile Test
8. Disk-Shaped Compact Tension Test
9. Illinois Flexibility Index Test

به منظور بررسی گسترش ترک و رفتار شکست مخلوط آسفالتی، روش‌های مختلفی از جمله آزمایش خمش سه یا چهار نقطه، آزمایش کشش غیر مستقیم و آزمایش خمش نیم دایره‌ای پیشنهاد شده‌اند. از میان آزمایش‌های یاد شده آزمایش خمش نیم دایره‌ای یکی از آزمایش‌های رایج برای اندازه‌گیری مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی می‌باشد. در این پژوهش به منظور ارزیابی تاثیر نرخ‌های بارگذاری بر پارامترهای مکانیک شکست مخلوط‌ها آسفالتی در دمای متوسط نمونه‌های نیم دیسکی به ازای نرخ‌ها مختلف بارگذاری (۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه) تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند که نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشد.

-نرخ‌های بارگذاری مختلف اثر قابل توجهی بر پارامترهای مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی دارند.

-با افزایش نرخ بارگذاری، مقدار Pcr و مقدار FE برای گسیختگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد.

-شاخص FI و CRI به ترتیب متاثر از پارامترهای مختلف m و Gf و پارامتر Gf و Pmax می‌باشد، بنابراین، با افزایش نرخ بارگذاری مشاهده روند ثابتی در این دو شاخص نیستیم.

-شاخص FI و FE نسبت به پارامترهای دیگر میزان ضریب تغییرات (COV) بزرگتری دارند و نسبت به نرخ بارگذاری حساس هستند.

-شاخص CRI نسبت FI ضریب تغییرات کمتری دارد که علت آن شاخص پراکندگی کمتر مقدار Pmax نسبت به شیب نقطه عطف منحنی می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که شاخص CRI

۷- مراجع

- Liu, D., & Li, L. h., (2012), "Research on evaluating index of anti-cracking performance of asphalt mixture", *Journal of Building Materials*, 4.
- Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X., & Erkens, S., (2002), "Semi-circular bending test; simple but useful?" *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71.
- Nsengiyumva, G., (2015), "Development of semi-circular bending (SCB) fracture test for bituminous mixtures".
- Nsengiyumva, G., You, T., Kim, Y. R., & Beran, M., (2016), "Investigation of testing variables of semicircular bending test for asphalt concrete mixtures: experimental-statistical approach", Retrieved from.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Singhvi, P., Khan, T., Rivera-Perez, J., & El-Khatib, A., (2016), "Fracture characterization of asphalt mixtures with high recycled content using Illinois semicircular bending test method and flexibility index", *Transportation Research Record*, 2575(1), pp.130-137.
- Pirmohammad, S., & Kiani, A., (2016), "Study on fracture behavior of HMA mixtures under mixed mode I/III loading. *Engineering Fracture Mechanics*", 153, pp.80-90. doi:10.1016/j.engfracmech.2015.12.027.
- Pirmohammad, S., Majd-Shokorlou, Y., & Amani, B., (2019), "Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe₂O₃ and carbon nanotubes", *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-23. doi:10.1080/14680629.2019.1608289.
- Wagoner, M., Buttlar, W. G., & Paulino, G., (2005), "Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture", *Experimental Mechanics*, 45(3), pp.270-277.
- Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T., . . . Doll, B., (2015), "Testing protocols to ensure performance of high asphalt binder replacement mixes using RAP and RAS (0197-9191)", Retrieved from.
- Aliha, M., Bahmani, A., & Akhondi, S., (2016), "A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites-Experimental and theoretical study", *International Journal of Solids and Structures*, 90, pp.167-177.
- Chen, L., Qian, Z., & Wang, J., (2015), "Multiscale numerical modeling of steel bridge deck pavements considering vehicle-pavement interaction", *International Journal of Geomechanics*, 16(1), B4015002.
- Chen, X., & Solaimanian, M., (2019), "Effect of Test Temperature and Displacement Rate on Semicircular Bend Test", *Journal of materials in civil engineering*, 31(7), 04019104.
- Chong, K., & Kuruppu, M., (1984), "New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials", *International Journal of Fracture*, 26(2), R59-R62.
- Im, S., Ban, H., & Kim, Y. R., (2014), "Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry", *Construction and Building Materials*, 52, pp.413-421.
- Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S., & Salari, S., (2018), "Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test", *Construction and Building Materials*, 167, pp.286-298.
- Ling, C., Swiertz, D., Mandal, T., Teymourpour, P., & Bahia, H., (2017), "Sensitivity of the Illinois flexibility index test to mixture design factors", *Transportation Research Record*, 2631(1), pp.153-159.

Pavement", *Journal of Stress Analysis*, 5(1), pp.85-98. doi:10.22084/jrstan.2020.22325.1153.

-Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M. R. M., Pirmohammad, S., & Haghshenas, H. F., (2021), "Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes", *Construction and Building Materials*, 300, 124130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124130>.

-Zofka, A., & Braham, A., (2009), "Comparison of low-temperature field performance and laboratory testing of 10 test sections in the Midwestern United States", *Transportation Research Record*, 2127(1), pp.107-114.

-Wu, Z., Mohammad, L. N., Wang, L., & Mull, M. A., (2005), "Fracture resistance characterization of superpave mixtures using the semi-circular bending test", *Journal of ASTM International*, 2(3), pp.1-15.

-Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzi, A., & Haghshenas, H., (2021), "Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)", *Construction and Building Materials*, 268, 121200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>.

-Yousefi, A., Pirmohammad, S., & Sobhi, S., (2020), "Fracture Toughness of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt

Evaluation of The Effect of Loading Rate of Semi-circular Bending Test on Different Fracture Mechanical Parameters of Asphalt Mixtures at Intermediate Temperature

Afshar A. Yousefi, M.Sc., Grad., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Ata Nowruzi, M.Sc., Grad., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Yashar A. Yousefi, B.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Payame Noor,
University Ardabil, Iran.*

Saeid Sobhi, M.Sc., Grad., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

E-mail: afshar_yusefi@civileng.iust.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Asphalt pavement cracking is one of the most common pavement failures that can be caused by fatigue and aging of asphalt mixtures under environmental conditions and traffic loads, causing other damage to asphalt pavements. For this reason, investigation of fracture behavior and precise evaluation of mechanical fracture parameters of asphalt mixtures and its effective parameters can assist pavement engineers in designing and constructing high-quality pavements. In this study, semi-circular bending specimens (SCB) were used to evaluate the impact of experimental loading rates on different fracture mechanics parameters of asphalt mixtures at intermediate temperatures (25° C). The main objective of this study was to determine the most appropriate loading rate for SCB testing at an intermediate temperature, taking into account the coefficient of variation of the test and with specimens with geometrical characteristics of diameter and thickness, 15 and 3 cm and crack length equal to 18 mm. For this purpose, SCB samples were subjected to loading rates of 0.5, 1, 3, 5, 20, and 50 mm / min and Peak Load parameters for cracking of asphalt samples (PL), Fracture Energy of asphalt samples (FE). Flexibility Index (FI) and Cracking Resistance Index (CRI) were evaluated. The results showed that as the loading rate increased, the amount of PL and FE for the asphalt mix increased, but FI and CRI did not show a significant increase with the loading rate. Based on the results of the experiments and evaluation of the coefficient of variation (COV) of the parameters mentioned, loading rates of 3 and 5 mm / min are recommended for use in the SCB test.

Keywords: Semi-circular Bending Test (SCB), Intermediate Temperature, Flexibility Index (FI), Coefficient of Variation (COV), Cracking Resistance Index (CRI), Loading Rate